

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ

Голубкова И.А.

Смирнов С.В., д.т.н., заведующий лабораторией Микромеханики материалов.

Учреждение Российской академии наук. Институт машиноведения Уральского отделения РАН,
г. Екатеринбург.

Одним из приоритетных направлений развития машиностроения является использование высокопрочных материалов. Для формирования высокопрочностных состояний в металлических материалах могут быть использованы методы интенсивной пластической деформации [1,2]. Две основные причины ограничивают применение холодной прокатки для этих целей – увеличение контактных напряжений, усилий прокатки и ограниченная пластичность металла в условиях холодной деформации, которая приводит к его разрушению.

Целью данной работы является постановка задачи объемного моделирования холодной прокатки, с помощью которой можно было бы изучать особенности напряженно – деформированного состояния и прогнозирования разрушения металла при прокатке в зависимости от технологических факторов и свойств деформируемого металла.

Моделировалась холодная прокатка полосы в гладких валках с использованием программы LS-DYNA. Решение тестовых задач, для которых имеется экспериментальная информация о состоянии металла, позволяет выяснить влияние на характер решения числа элементов, величины свободных участков полосы на входе и выходе из валков и выбрать оптимальные их величины, обеспечивающие достаточную точность при возможно меньших затратах машинного времени. Для оценки возможностей модели решались тестовые задачи с использованием данных [3], полученных в ходе экспериментального исследования контактных напряжений при холодной прокатке для алюминиевых образцов разной высоты на лабораторном стане в валках диаметром 196 мм при частоте вращения 11 об/мин. Для материала полосы использовали классическую изотропную упругопластическую модель поведения материала при деформировании. В расчетах принимали для прокатываемых алюминиевых образцов плотность $\rho=2700 \text{ кг/м}^3$; коэффициент Пуассона $\nu=0,35$, модуль Юнга $E=0,7 \cdot 10^5 \text{ МПа}$. Сопротивление деформации $\sigma_s(\varepsilon_{\text{эв}})$ в условии пластичности Мизеса задавали в табличной форме в соответствии с данными из работы [3].

Твердотельная модель процесса прокатки образцов была создана средствами конечно - элементного комплекса ANSYS/LS-DYNA (рис.1). Для описания контактного взаимодействия между валками и заготовкой использовали специальный тип контакта между абсолютно жестким телом и упругопластическим телом [4]. Контактное трение постоянно и подчиняется закону Амонтона – Кулона, с коэффициентом $k=0.3$. Для минимизации функционала вариационного принципа Лагранжа был

выбран метод Бройдена-Флетчера-Гольдфарба-Шэнно, являющийся одной из модификаций метода Ньютона [5]. Для решения системы линейных уравнений на очередной итерации поиска минимума функционала использовали метод сопряженных градиентов и неявную схему интегрирования по временной области. Размер шага по времени выбран на основании решения тестовых задач и составлял $1 \cdot 10^{-6} \text{ с}$. Для контроля устойчивости численного решения в ходе расчетов выполняли проверку энергетического баланса системы: контролировали работу внешних сил, энергию формоизменения, потенциальную энергию упругой деформации заготовки, кинетическую энергию заготовки, рассеяние энергии в контакте заготовки с валками.

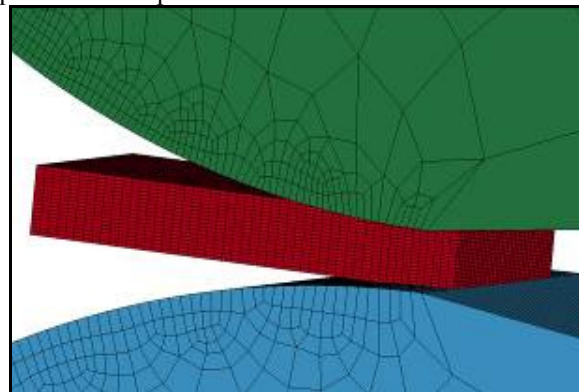


Рис. 1. Конечно – элементная модель

Размеры образцов, прокатку которых моделировали, приведены в таблице 1. Исходная ширина всех образцов при прокатке была 36 мм.

Таблица 1
Размеры образцов, параметры ε и ℓ/H_c
при прокатке [3]

№ образца	H_0 , мм	H_1 , мм	ℓ , мм	ℓ/H_c	ε , %
1	36	30,96	22,22	0,6	14
2	12	9,12	16,80	1,6	24
3	6	4,8	10,84	2	20
4	1,5	1,005	6,96	5,7	33

В теории холодной прокатки принято, что энергосиловые параметры прокатки и напряженно – деформированное состояние зависят от двух безразмерных параметров – относительного обжатия

$$\varepsilon = \frac{H_0 - H_1}{H_0} 100\% \text{ и фактора очага деформации } \ell/H_c$$

(ℓ - длина геометрического очага деформации, $H_c = 0,5(H_0 + H_1)$ – средняя высота полосы при прокатке).

Величина ℓ рассчитывается по формуле

$$\ell = \sqrt{(H_0 - H_1) \frac{D_B}{2}}, \quad (1)$$

где D_B – диаметр вала.

Нормальные контактные напряжения были определены авторами работы [3] с помощью специального измерительного устройства с радиальными штифтами, расположенными по дуге вала и опирающимися на систему упругих элементов.

Экспериментальные эпюры и эпюры, полученные при моделировании, нормальных контактных напряжений при прокатке полос разной высоты приведены на рис. 2, где y – расстояние от

середины полосы до линии вдоль которой измеряются нормальные напряжения.

В работе [3] контактные давления определены в геометрическом очаге деформации. Как видно из рис. 2, картина распределений давлений меняется в зависимости от толщины прокатываемой полосы: смещается пик, на который приходится максимум нормальных напряжений. Зависимость вида эпюр нормальных напряжений от формы очага деформации l/H_c определяется влиянием внеконтактных зон на нормальные давления и силами трения [6].

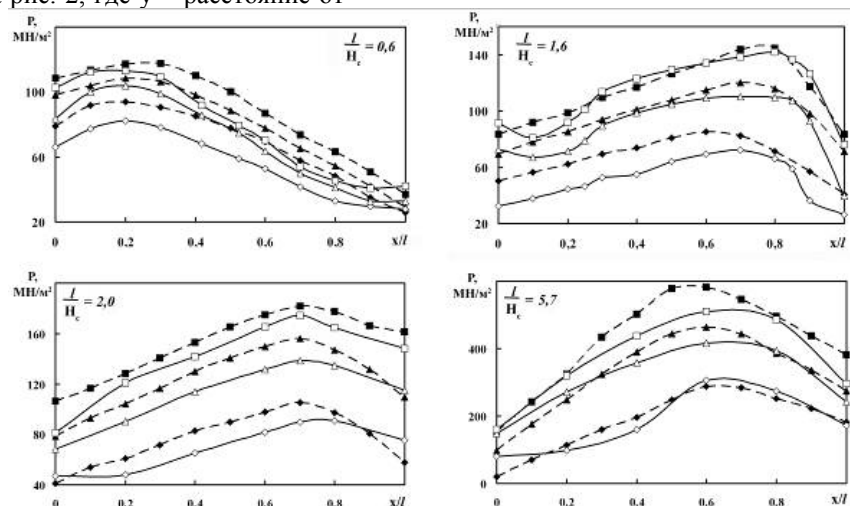


Рис.2. Эпюры нормальных контактных напряжений p при различных l/H_c и y :
опытные данные [3] — \blacksquare — $y=0$; \blacktriangle — $y=8$ мм; \blacklozenge — $y=15$ мм;
данные моделирования — \square — $y=0$; \triangle — $y=8$ мм; \lozenge — $y=15$ мм.

Так при $l/H_c=0,6$ максимум эпюры находится вблизи входа в валки. На эпюрах при прокатке более тонких полос ($l/H_c=1,6; 2; 5,7$) максимум почти совпадает с линией, на которой происходит изменение знака сил трения (нейтральная линия) [7], и располагается вблизи середины геометрического очага деформации. Анализ полученных эпюр нормальных напряжений показал, что величина и закономерности их распределения по контактной поверхности связаны с параметрами очага, определяющими характер неравномерности деформации. Сопоставление опытных эпюр и эпюр, полученных при решении тестовых задач, показало, что они качественно и количественно подобны. Это позволяет говорить об возможности использования конечно – элементной модели, построенной в среде LS-DYNA.

Работа выполняется при частичной финансовой поддержки Программы Президиума РАН №22 и гранта РФФИ № 09-08-01091

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. N.Tsuji, Y.Saito, H.Utsunomiya S.Tanigawa // Scripta Materialia. Vol.40. No. 7. P. 795-800.
2. Y. Saito, H.Utsunomiya, N.Tsuji // Acta mater. Vol. 47. No. 2. P. 579-583.
3. Тарновский И.Я., Леванов А.Н., Поксеев М.И. Контактные напряжения при пластической деформации. М.: Металлургия. 1966. С. 280.
4. J. Hallquist. "LS-DYNA Keyword Users Manual". Livermore Software Technology Corporation, Livermore CA. 2007. С. 1421.
5. H. Mullerschön, D. Lorenz, W. Roux, M. Liebscher, S. Pannier, K. Roll. Probabilistic analysis of uncertainties in the manufacturing process of metal forming // 6th European LS-DYNA Users' Conference. 2007.
6. Целиков А.И. Основы теории прокатки. М.: Металлургия. 1965. С. 248.
7. Тарновский И.Я., Поздеев А.А., Ляшков В.Б. Деформация металла при прокатке. Свердловск: Металлургиздат. 1966. С. 288.